

М.В. Уткин

Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия
E-mail: fftrrls@gmail.com

Перекрестная датировка по нескольким параметрам: применение изотопного анализа для расширения древесно-кольцевых хронологий (зарубежный опыт)

Дендрохронологический анализ – достаточно эффективный метод датирования исторической древесины, однако у него есть ряд существенных ограничений. Это особенно заметно при рассмотрении ранних сегментов древесно-кольцевых хронологий, где насыщенность образцами и количество перекрытий, как правило, сильно уменьшаются. На этих участках неправильно датированные древесно-кольцевые серии могут привести к критическим ошибкам при их дальнейшем сведении в общую хронологию. Учитывая это, в итоговые результаты исследований чаще всего включаются только образцы с высокой достоверностью датирования, в результате чего часть недатированной древесины вынужденно игнорируется. Однако в последнее время, помимо хронологий, построенных по ширине годичного кольца (TRW) и максимальной плотности поздней древесины (MXD), набирает популярность новый метод датирования живой и исторической древесины: по стабильным изотопам кислорода и углерода, содержащимся в древесных кольцах. Первые результаты этих исследований продемонстрировали возможность согласовывать данные не только между деревьями одного вида, произрастающими на общей территории, но и даже между деревьями разных видов. Кроме того, все активнее развивается способ высокоточного радиоуглеродного датирования по объективным временным маркерам, называемым «событиями Мияке». В 2023 г. коллективом авторов из Германии и Чехии было проведено уникальное исследование, сочетающее в себе все современные способы перекрестной датировки, а именно использование нескольких параметров одновременно, включая TRW, MXD, а также данные, полученные по стабильным изотопам углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и радиоуглеродного (^{14}C) анализа. Последние два были использованы для оценки и исправления ошибок датирования ранних сегментов самой длинной древесно-кольцевой хронологии для высокогорий Средиземноморского бассейна. Результаты убедительно доказывают, что объединение TRW-хронологий с измерениями по $\delta^{13}\text{C}$ позволяют получить гораздо более надежные датировки сомнительных и мало коррелирующих друг с другом участков хронологий.

Ключевые слова: дендрохронология, перекрестная датировка, изотопный анализ, стабильные изотопы углерода, радиоуглерод, историческая древесина.

M.V. Utkin

Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia
E-mail: fftrrls@gmail.com

Multi-parameter Cross-dating: Using Isotope Analysis to Extend Tree-ring Chronologies (Foreign Research Data)

Dendrochronological analysis is a fairly effective method of dating historical wood; however, it is not without significant limitations. This is particularly evident in considering the early segments of tree-ring chronologies, where both availability of historical wood and the amount of chronological curve overlaps are insufficient. Inclusion of incorrectly dated tree-ring series incorporated into an overall chronology can result in significant errors. In light of these considerations, only samples with high dating confidence are typically included in concluding research data; this situation results in the exclusion of some undated wood from scientific circulation. Recently, in addition to chronologies based on annual ring width (TRW) and maximum latewood density (MXD), a new promising method of dating living and historic wood has been proposed: by stable oxygen and carbon isotopes

contained in tree rings. The initial findings of these studies have indicated that it is feasible to align data not only between trees of the same species growing in a common area, but also between trees of disparate species. Furthermore, the method of high-precision radiocarbon dating based on objective time markers, known as 'Miyake events', is being successfully developed. In 2023, a team of authors from Germany and the Czech Republic conducted unique research that combined all modern cross-dating methods, namely the use of several parameters simultaneously, including TRW, MXD, $\delta^{13}\text{C}$ and ^{14}C . The researchers used combined stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) and radiocarbon (^{14}C) data in estimating and correcting dating errors in the initial segments of the longest tree-ring chronology generated for the highlands of the Mediterranean Basin. The findings provide compelling evidence that integrating TRW chronologies with $\delta^{13}\text{C}$ measurements facilitates considerably more reliable dating of uncertain and poorly correlated sections of the chronologies.

Keywords: dendrochronology, cross-dating, isotopic analysis, stable carbon isotopes, radiocarbon, historic wood.

Введение

В широком смысле слова, дендрохронология занимается датировкой годовых колец древесины и анализом содержащейся в них информации. При этом объектом исследования выступают различные показатели годового прироста в стволах, ветвях и корнях древесных растений, а также их физико-механические свойства, анатомическая структура и химический состав древесины [Карпухин, 2016, с. 52–53].

Принцип перекрестной датировки является важнейшим в дендрохронологии и разработан с целью абсолютной и относительной датировки формирования колец с точностью до года. Его суть заключается в следующем: древесные растения, произрастающие в пределах однородного климатического района, сходно реагируют величиной прироста на изменения лимитирующих климатических факторов, в результате чего у них наблюдается синхронная изменчивость ширины годовых колец. Данный метод позволяет выявлять местонахождение выпавших и ложных колец, а также производить абсолютную и относительную датировку каждого кольца у сравниваемых индивидуальных древесно-кольцевых хронологий (ДХК), а также продлевать хронологии далеко вглубь веков на основе использования древесины давно отмерших деревьев (археологической древесины, архитектурной древесины, сухостоя, валежа, а также захороненной в торфяных, речных и озерных отложениях полуископаемой древесины голоценового возраста) [Шиятов и др., 2000, с. 16–18].

Параметры годового кольца, которые могут быть так или иначе измерены и изучены, довольно различны, однако из множества характеристик годового кольца наиболее часто продолжают использовать результаты измерений его ширины, которые несколько реже подразделяются на значения ширины ранней и поздней древесины. Для этого в настоящее время используется относительно простое и распространенное полуавтоматическое оборудование [Карпухин, 2016, с. 52–53].

Результаты, полученные в процессе перекрестной датировки, являются наиболее репрезентативными, когда годовичный прирост древесины ограничивается тем или иным лимитирующим фактором окружаю-

щей среды [Fritts, 1976, p. 567]. Препятствовать же успешному дендрохронологическому датированию по ширине годового кольца могут как благоприятные условия роста деревьев, приводящие к формированию благодущных (инвариантных, самоуспокоенных) колец, так и различные структурные аномалии, такие как ложные, отсутствующие и клиновидные кольца, а также внутригодовые колебания плотности древесины [Ibid.].

Помимо данных, полученных при измерении ширины годовых колец (tree ring width, или TRW), для перекрестной датировки также довольно часто применяют измерения максимальной плотности поздней древесины (maximum latewood density, или MXD). Полученные в результате подобных измерений данные обычно содержат значительно меньше неклиматических шумов, кроме того, они являются менее восприимчивыми к серьезным нарушениям роста, что в свою очередь повышает успешность перекрестной датировки [Rydval et al., 2018].

Тем не менее, несмотря на неоспоримые методологические достижения последних десятилетий в исследовании максимальной плотности поздней древесины (появление новых методик рентгеновской денситометрии годовых колец деревьев [Bjorklund et al., 2019]), датирование археологической древесины неизвестного возраста с использованием только TRW/MXD данных по-прежнему остается довольно сложной задачей. Это особенно заметно, если рассматривать ранние сегменты древесно-кольцевых хронологий, где насыщенность образцами и количество перекрытий (наслаиваний отдельных древесно-кольцевых рядов друг на друга) обычно существенно уменьшаются. На этих участках неправильно датированные древесно-кольцевые серии могут привести к критическим ошибкам при их дальнейшем сведении в общую хронологию.

Таким образом, принимая данную опасность во внимание, в итоговые результаты исследования учеными чаще всего включаются только образцы с высокой достоверностью датирования, в результате чего большое количество измеренной, но недатированной археологической древесины вынужденно игнорируется, что довольно часто приводит к сложностям в дальнейшем удлинении абсолютно датированных древесно-кольцевых хронологий в прошлое.

Использование изотопов углерода и кислорода в качестве инструмента датировки древесно-кольцевых хронологий

Помимо хронологий, построенных по ширине годичного кольца (TRW) и максимальной плотности поздней древесины (MXD), в последнее время все более набирает популярность способ датирования живой и исторической древесины при помощи стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) [Roden, 2008; Loader et al., 2019, 2021]. Поскольку содержание $\delta^{13}\text{C}$ отражает баланс между устьичной проводимостью листьев и ассимиляцией CO_2 в процессе фотосинтеза, а количество $\delta^{18}\text{O}$ определяется транспирацией листьев и варьирует в зависимости от источников поступления воды [McCarroll, Loader, 2004], оба стабильных изотопа годичных колец (tree ring stable isotopes, или TRSI) содержат важную информацию о прошлых климатических условиях и демонстрируют сильную согласованность не только между деревьями одного вида, произрастающими на общей территории, но и даже между деревьями разных видов [Hartl-Meier et al., 2015; Loader et al., 2021].

Самым известным и часто используемым способом определить возраст дендрохронологических образцов при помощи изотопного анализа является т.н. радиоуглеродный анализ – высокоточные измерения содержания радиоуглерода (^{14}C) в образце, проводимые на ускорительном масс-спектрометре. Полученные результаты калибруются Международной калибровочной кривой радиоуглеродного возраста Северного полушария (IntCal20). Однако, чтобы минимизировать неопределенности датирования ^{14}C , возникающие из-за немонотонности IntCal20, в дендрохронологии часто прибегают к т.н. процедуре *wiggle-matching*, когда для радиоуглеродных измерений извлекается несколько колец вдоль одного образца древесины, которые в дальнейшем систематически сравниваются с калибровочной кривой [Bronk, Pflicht, Weninger, 2001].

Кроме того, в качестве объективных временных маркеров, позволяющих проводить абсолютное радиоуглеродное датирование, выходящее за рамки методологической неопределенности радиоуглеродного метода, могут использоваться феномены, получившие название «событий Мияке» – внезапные, единичные и глобально когерентные события существенного обогащения атмосферы радиоактивным углеродом, вероятно, вызванные кратковременным усилением космического излучения [Miyake et al., 2012].

Перекрестная датировка по нескольким параметрам (зарубежный опыт)

В 2023 г. коллективом авторов [Romer et al., 2023] было проведено уникальное исследование, сочетающее в себе самые современные подходы и методы пе-

рекрестной датировки с использованием нескольких параметров одновременно, включая TRW, MXD, $\delta^{13}\text{C}$ и ^{14}C . Ими были поставлены задачи по преодолению проблемы датировки реликтовой древесины сосны в районе горы Смоликас (Греция), а также по исправлению ошибок и неточностей в ранних сегментах древесно-кольцевых хронологий, на тот момент уже построенных для данного региона и состоящих из 878 измерений по ширине годичного кольца (TRW), а также 192 измерений максимальной плотности поздней древесины (MXD) [Ibid.].

Для их решения авторами была создана непрерывная погодичная изотопная хронология по $\delta^{13}\text{C}$, включающая в себя 4 151 индивидуальное измерение, пробы для которых были отобраны с 17 хорошо сохранившихся спилов, дендрохронологически датированных первым тысячелетием н.э. В качестве меры предосторожности (чтобы избежать потенциальных ювенильных эффектов), 50 внутренних колец каждого образца (с учетом смещения сердцевины) были исключены из выборки.

После тщательной резки и разделения каждого годичного кольца на куски волокон одинакового размера, α -целлюлоза была извлечена из всей древесины с помощью модифицированного метода выделения Джейме – Уайза. Для измерений $\delta^{13}\text{C}$ 0,2–1,0 мг α -целлюлозы помещали в жестяные капсулы и сжигали до CO_2 при 960 °C с использованием элементного анализатора varioPYRO cube. Из газа CO_2 определяли соотношение тяжелых (^{13}C) и легких (^{12}C) изотопов углерода с помощью масс-спектрометра ISOPRIME100, работающего в режиме непрерывного потока. Для определения точности соотношений $\delta^{13}\text{C}$ было проведено по шесть последовательных измерений для каждого из образцов α -целлюлозы. Диапазон между минимальными и максимальными значениями и стандартное отклонение (σ) составили 0,12 ‰ и 0,042 ‰ соответственно.

Стандартизация мастерских хронологий проводилась с использованием специализированного программного пакета ARSTAN [Cook, Krusic, 2008]. Для стандартизации данных TRW, MXD и $\delta^{13}\text{C}$ отдельные ряды годичных колец деревьев были преобразованы по мощности и отфильтрованы с помощью высокочастотного фильтра путем вычисления остатков с помощью кубических сглаживающих сплайнов с 50 % срезом частотной характеристики на 30 лет [Cook, Peters, 1981; Wigley, Jones, Briffa, 1987]. Связи между отдельными сериями оценивались коэффициентом межсерийной корреляции (R_{bar}), а также коэффициентом выраженного популяционного сигнала EPS [Wigley, Jones, Briffa, 1987], вычисленного по 50-летним сегментам с 49-летним перекрытием. Хотя новые серии $\delta^{13}\text{C}$ были датированы в соответствии с их соответствующими измерениями TRW/MXD [Esper et al., 2020, 2021], их степень внутреннего перекрестного датирования оценивалась отдельно с использованием COFECHA [Holmes, 1983].

Результат кросс-корреляционного анализа между отфильтрованными по высоким частотам сериями $\delta^{13}\text{C}$ и их мастерской хронологией COFESHA поставил под сомнение возраст второго из самых ранних образцов реликтовой сосны (Pine16), предложив переместить его предполагаемое расположение, полученное с помощью анализа ширины годичного кольца, с 597–852 гг. н.э. (Opt1) на новое место, а именно – на 468–723 гг. н.э. (Opt2).

Для независимой проверки полученных результатов дополнительно был проведен радиоуглеродный анализ двух образцов (того, в котором была обнаружена ошибка, а также еще одного образца, показывающего высокую дендрохронологическую достоверность из-за высоких коэффициентов корреляции как с хронологией по ширине кольца, так и с хронологией по $\delta^{13}\text{C}$). С каждого из образцов был отобран материал из колец, предположительно охватывающий календарный период в 772–777 гг. н.э. (этот сегмент был выбран специально, чтобы по нему можно было отчетливо зафиксировать событие Мияке 774 г., которое является объективным временным маркером для абсолютных радиоуглеродных датировок). Полученные результаты дали были однозначными: *wiggle-matching* и калиброванные ^{14}C датировки образцов полностью соответствовали положению, полученному дендрохронологически.

Таким образом, конечным итогом описанного выше мультидисциплинарного исследования стал пересмотр ранней части древесно-кольцевой хронологии горы Смоликас (а именно, возраста образца Pine16), что, в свою очередь, удлинит ее более, чем на столетие назад. Благодаря проверке ранних сегментов хронологии при помощи $\delta^{13}\text{C}$ и ^{14}C , дата начала абсолютной хронологии горы Смоликас была передвинута на 468 г. н.э. Построенная хронология по $\delta^{13}\text{C}$, хоть и начинается на 47 лет позже (в 514 г. н.э.), однако демонстрирует гораздо более ярко выраженную изменчивость от года к году, а также более высокую общую силу сигнала, что, в свою очередь, значительно уменьшает вероятность ошибок в VI и VII вв. н.э.

Заключение

В описанном выше исследовании авторы наглядно демонстрируют, что объединение TRW-хронологий с измерениями $\delta^{13}\text{C}$ позволяет проводить гораздо более надежное датирование самых ранних хронологических периодов древесно-кольцевых хронологий, преодолевая типичные проблемы перекрестного датирования, такие как маленькое число образцов и низкие межсерийные коэффициенты корреляции. Несмотря на то, что исследованный сегмент хронологии был представлен лишь одним образцом древесины, полученные результаты были независимо подтверждены благодаря высокоточному ^{14}C -датированию по событию Мияке.

Подводя итог, если говорить об основных преимуществах и ограничениях данного метода, необходимо заметить, что одним из главных преимуществ изотопных хронологий перед хронологиями, построенными по ширине и плотности колец, является то, что в случае TRW и MXD-хронологий для получения достаточно репрезентативных результатов необходимо иметь более десяти древесно-кольцевых серий, в то время как для получения надежной хронологии по стабильным изотопам требуется лишь три. Данное утверждение подтверждается и предыдущими исследованиями TRSI, в которых описывается репликация образцов из 4-6 деревьев, достаточная для разработки надежных репрезентативных локальных хронологий [Leavitt, 2010; Belmecheri, Wright, Szejner, 2022].

Тем не менее, несмотря на множество технологических и методологических достижений последних десятилетий, довольно маловероятно, что TRSI заменит TRW для обычного перекрестного датирования из-за крайне ресурсоемкой подготовки образцов и измерений. Однако наблюдаемая надежная ковариация $\delta^{13}\text{C}$ между отдельными деревьями дает уникальную возможность датировать проблемные образцы с вполне разумными усилиями и затратами.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках темы НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2022-0010 «Палеоэкология человека и реконструкция природных условий Евразии в четвертичном периоде».

Список литературы

- Карпунин А.А.** Дендрохронология в археологии: методические аспекты // Междисциплинарная интеграция в археологии (по мат-лам лекций для аспирантов и молодых сотрудников). – М.: ИА РАН, 2016. – С. 52–53.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М.** Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-методич. пособие. – Красноярск: Красн. гос. ун-т, 2000. – Ч. I. – С. 16–18.
- Belmecheri S., Wright W.E., Szejner P.** Sample collection and preparation for annual and intra-annual tree-ring isotope chronologies // Stable Isotopes in Tree Rings – Inferring Physiological, Climatic and Environmental Responses. Springer, 2022. – P. 103–134.
- Bjorklund J., Arx G., von, Nievergelt D., Wilson R., Van den Bulcke J., Günther B., Loader N.J., Rydval M., Fonti P., Scharnweber T., Andreu-Hayles L., Buntgen U., D'Arrigo R., Davi N., De Mil T., Esper J., Gartner H., Geary J., Gunnarson B.E., Hartl C., Hevia A., Song H., Janecka K., Kaczka R.J., Kirilyanov A.V., Kochbeck M., Liu Y., Meko M., Mundo I., Nicolussi K., Oelkers R.,**

Pichler T., Sanchez-Salguero R., Schneider L., Schweingruber F., Timonen M., Trouet V., Van Acker J., Verstege A., Villalba R., Wilmking M., Frank D. Scientific merits and analytical challenges of tree-ring densitometry // *Reviews of Geophysics*. – 2019. – Vol. 57. – P. 1224–1264. – doi:10.1029/2019RG000642

Bronk Ramsey C., van der Pflicht J., Weninger B. ‘Wiggle matching’ radiocarbon dates // *Radiocarbon*. – 2001. – Vol. 43. – P. 381–389. – doi:10.1017/S0033822200038248

Cook E.R., Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies // *Tree-Ring Bulletin*. – 1981. – Vol. 41. – P. 43–45.

Cook R., Krusic P.J. A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics (ARSTAN). – 2008. – URL: <http://www.ldeo.columbia.edu/treering-laboratory/resources/software> (дата обращения: 01.06.2024).

Esper J., Klippel L., Krusic P.J., Konter O., Raible C.C., Xoplaki E., Luterbacher J., Buntgen U. Eastern Mediterranean summer temperatures since 730 CE from Mt. Smolikas tree-ring densities // *Climate Dynamics*. – 2020. – Vol. 54. – P. 1367–1382.

Esper J., Konter O., Klippel L., Krusic P.J., Buntgen U. Pre-instrumental summer precipitation variability in northwestern Greece from a high-elevation *Pinus heldreichii* network // *Intern. J. of Climatology*. – 2021. – Vol. 41. – P. 2828–2839. – doi:10.1002/joc.6992

Fritts H.C. *Tree Rings and Climate*. – N. Y.: Academic Press, 1976. – 567 p.

Hartl-Meier C., Zang C., Buntgen U., Esper J., Rothe A., Gottlein A., Dirnbock T., Treydte K. Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest // *Tree Physiology*. – 2015. – Vol. 35. – P. 4–15. – doi:10.1093/treephys/tpu096

Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring bulletin*. – 1983. – Vol. 44. – P. 69–78.

Leavitt S.W. Tree-ring C–H–O isotope variability and sampling // *Science of The Total Environment*. – 2010. – Vol. 408. – P. 5244–5253. – doi:10.1016/j.scitotenv.2010.07.057

Loader N.J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B. Tree ring dating using oxygen isotopes: a master chronology for central England // *J. of Quatern. Sci.* – 2019. – Vol. 34. – P. 475–490. – doi:10.1002/jqs.3115

Loader N.J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B., Williams M., Fudge M. Dating of non-oak species in the United Kingdom historical buildings archive using stable oxygen isotopes // *Dendrochronologia*. – 2021. – Vol. 69. – doi:10.1016/j.dendro.2021.125862

McCarroll D., Loader N.J. Stable isotopes in tree rings // *Quatern. Sci. Rev.* – 2004. – Vol. 23. – P. 771–801. – doi:10.1016/j.quascirev.2003.06.017

Miyake F., Nagaya K., Masuda K., Nakamura T. A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan // *Nature*. – 2012. – Vol. 486. – P. 240–242. – doi:10.1038/nature11123

Roden J. Cross-dating of tree ring delta O-18 and delta C-13 time series // *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 252 (1–2). – P. 72–79.

Romer P., Reinig F., Konter O., Friedrich R., Urban O., Caslavsky J., Pernicova N., Trnka M., Buntgen U., Esper J. Multi-proxy crossdating extends the longest high-elevation tree-ring chronology from the Mediterranean // *Dendrochronologia*. – 2023. – Vol. 79. – 126085. – doi:10.1016/j.dendro.2023.126085

Rydval M., Druckenbrod D.L., Svoboda M., Trotsiuk V., Janda P., Mikolas M., Cada V., Bace R., Teodosiu M., Wilson R. Influence of sampling and disturbance history on climatic sensitivity of temperature-limited conifers // *Holocene*. – 2018. – Vol. 28. – P. 1574–1587. – doi:10.1177/0959683618782

Wigley T.M.L., Jones P.D., Briffa K.R. Cross-dating methods in dendrochronology // *J. of Archaeol. Sci.* – 1987. – Vol. 14. – P. 51–64. – doi:10.1016/S0305-4403(87)80005-5

References

Belmecheri S., Wright W.E., Szejner P. Sample collection and preparation for annual and intra-annual tree-ring isotope chronologies. In *Stable Isotopes in Tree Rings – Inferring Physiological, Climatic and Environmental Responses*, 2022. P. 103–134.

Bjorklund J., Arx G., von, Nievergelt D., Wilson R., Van den Bulcke J., Günther B., Loader N.J., Rydval M., Fonti P., Scharnweber T., Andreu-Hayles L., Buntgen U., D’Arrigo R., Davi N., De Mil T., Esper J., Gartner H., Geary J., Gunnarson B.E., Hartl C., Hevia A., Song H., Janecka K., Kaczka R.J., Kirilyanov A.V., Kochbeck M., Liu Y., Meko M., Mundo I., Nicolussi K., Oelkers R., Pichler T., Sanchez-Salguero R., Schneider L., Schweingruber F., Timonen M., Trouet V., Van Acker J., Verstege A., Villalba R., Wilmking M., Frank D. Scientific merits and analytical challenges of tree-ring densitometry. *Reviews of Geophysics*, 2019. Vol. 57. P. 1224–1264. doi:10.1029/2019RG000642

Bronk Ramsey C., van der Pflicht J., Weninger B. ‘Wiggle matching’ radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 2001. Vol. 43. P. 381–389. doi:10.1017/S0033822200038248

Cook E.R., Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 1981. Vol. 41. P. 43–45.

Cook R., Krusic P.J. A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics (ARSTAN). 2008. URL: <http://www.ldeo.columbia.edu/treering-laboratory/resources/software> (Accessed: 01.06.2024).

Esper J., Klippel L., Krusic P.J., Konter O., Raible C.C., Xoplaki E., Luterbacher J., Buntgen U. Eastern Mediterranean summer temperatures since 730 CE from Mt. Smolikas tree-ring densities. *Climate Dynamics*, 2020. Vol. 54. P. 1367–1382.

Esper J., Konter O., Klippel L., Krusic P.J., Buntgen U. Pre-instrumental summer precipitation variability in northwestern Greece from a high-elevation *Pinus heldreichii*

network. *Intern. J. of Climatology*, 2021. Vol. 41. P. 2828–2839. doi:10.1002/joc.6992

Fritts H.C. Tree Rings and Climate. N. Y.: Academic Press, 1976. 567 p.

Hartl-Meier C., Zang C., Büntgen U., Esper J., Rothe A., Gottlein A., Dirnbock T., Treydte K. Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest. *Tree Physiology*, 2004. Vol. 35. P. 4–15. doi:10.1093/treephys/tpu096

Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring bulletin*, 1983. Vol. 44. P. 69–78.

Karpukhin A.A. Dendrokronologiya v arkhologii: metodicheskiye aspekty. In *Mezhdistsiplinarnaya integratsiya v arkhologii (po materialam lektsiy dlya aspirantov i molodykh sotrudnikov)*. Moscow: IA RAS Publ., 2016. P. 52–53. (In Russ.).

Leavitt S.W. Tree-ring C–H–O isotope variability and sampling. *Science of The Total Environment*, 2010. Vol. 408. P. 5244–5253. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.07.057

Loader N.J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B. Tree ring dating using oxygen isotopes: a master chronology for central England. *J. of Quatern. Sci.*, 2019. Vol. 34. P. 475–490. doi:10.1002/jqs.3115

Loader N.J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B., Williams M., Fudge M. Dating of non-oak species in the United Kingdom historical buildings archive using stable oxygen isotopes. *Dendrochronologia*, 2021. Vol. 69. doi:10.1016/j.dendro.2021.125862

McCarroll D., Loader N.J. Stable isotopes in tree rings. *Quatern. Sci. Rev.*, 2004. Vol. 23. P. 771–801. doi:10.1016/j.quascirev.2003.06.017

Miyake F., Nagaya K., Masuda K., Nakamura T. A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan. *Nature*, 2012. Vol. 486. P. 240–242. doi:10.1038/nature11123

Roden J. Cross-dating of tree ring delta O-18 and delta C-13 time series. *Chemical Geology*, 2008. Vol. 252 (1–2). P. 72–79.

Romer P., Reinig F., Konter O., Friedrich R., Urban O., Caslavsky J., Pernicova N., Trnka M., Buntgen U., Esper J. Multi-proxy crossdating extends the longest high-elevation tree-ring chronology from the Mediterranean. *Dendrochronologia*, 2023. Vol. 79. 126085. doi:10.1016/j.dendro.2023.126085

Rydval M., Druckenbrod D.L., Svoboda M., Trotsiuk V., Janda P., Mikolas M., Cada V., Bace R., Teodosiu M., Wilson R. Influence of sampling and disturbance history on climatic sensitivity of temperature-limited conifers. *Holocene*, 2018. Vol. 28. P. 1574–1587. doi:10.1177/0959683618782

Shiyatov S.G., Vaganov Y.A., Kirilyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzabayev M.M., Khantemirov R.M. Metody dendrokronologii. Osnovy dendrokronologii. Sbor i polucheniye drevesno-kol'tsevoy informatsii: ucheb.-metodich. posobiye. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Univ. Press, 2000. Iss. 1. P. 16–18. (In Russ.).

Wigley T.M.L., Jones P.D., Briffa K.R. Cross-dating methods in dendrochronology. *J. of Archaeol. Sci.*, 1987. Vol. 14. P. 51–64. doi:10.1016/S0305-4403(87)80005-5

Уткин М.В. <https://orcid.org/0000-0003-2603-7728>

Дата сдачи рукописи: 01.09.2024 г.